

外ケーブル方式 PC 箱桁橋における模型定着部の挙動と破壊耐力

中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社 正会員 ○工修 井口 淳
 テイクイトレード株式会社 工修 長谷川晃久
 日本大学 正会員 工博 柳沼 善明

1. はじめに

外ケーブル方式 PC 箱桁橋における外ケーブルの定着には突起定着部が用いられ、突起定着部の破壊に対する安全性の検討も重要である。突起定着部の安全性は、実物大あるいは寸法を縮小した模型による実験^{1, 2)}で確認されているが、試験体が破壊に至る実験は数少なく、突起定着部周辺の破壊に関する研究も数少ない。このような背景から、プレストレストコンクリート技術協会では、「PC 箱桁定着部の破壊解析委員会 (委員長：田辺忠顕名古屋大学名誉教授)」を設置し、突起定着部の安全性が検討された。この委員会では、突起定着部周辺の有限要素法 (以下 FEM と略) の数値解析は弾性解析が主であり、突起定着部周辺の破壊形態が不明であることから、非線形 FEM を用いて突起定着部の破壊形態や破壊耐力を評価している。さらに、現時点での非線形 FEM の解析精度が未確認のため、非線形 FEM の解析結果をマクロ的な観点から判断できるマクロモデルを提案している。

そこで本研究は、突起定着部周辺をモデル化した模型供試体の破壊実験を実施し、破壊に至る挙動について調べるとともに、3次元非線形 FEM の解析結果と実験結果を比較検討し、さらにマクロモデルで算出された破壊耐力の計算結果を検討することを主な目的とした。

2. マクロモデルによる破壊耐力^{3, 4)}

突起定着部の破壊は3つの破壊パターンに分類され、破壊パターン1は定着突起内部の抵抗機構の破壊、破壊パターン2は突起と床版あるいはウェブとの境界におけるスリップ破壊、破壊パターン3は桁本体の構造破壊である。本研究では、突起定着部周辺の桁本体の破壊を対象としているため、破壊パターン3のマクロモデルによる破壊耐力についてのみ述べる。突起定着部をウェブから離れた位置に設置した場合、マクロモデルは箱桁から突起定着部の周囲を切り出したフリーボディ (図-1 参照) の各断面に、その断面の終局耐力に相当する断面力が作用するものとして、破壊耐力を算出している。定着力 P が作用しているフリーボディにおいて (図-2 参照)、終局状態で各断面力 (すなわち曲げモーメントの M_{S1} と M_{S3} 、ねじりモーメントの T_{S2} と T_{S4} 、面外せん断力の Q_{S1} と Q_{S3}) がそれぞれ塑性限界に達して、極限解析が可能な状態であるとする。なお、断面力 T_{S4} は、 T_{S2} の反対側の断面に作用し、その値は T_{S2} と同じである。図-2 のようにフリーボディが θ だけ剛体回転したとすれば、突起定着部の破壊耐力 P_{ult} は仮想仕事の原理から

$$P_{ult} = (1.0/z_2) (-M_{S1}^u + M_{S3}^u + 2T_{S2}^u) - (L/z_2) (Q_{S1}^u + Q_{S3}^u) \dots \dots \dots (1)$$

となる。それぞれの終局耐力 (M_{S1}^u , M_{S3}^u , T_{S2}^u , Q_{S1}^u , Q_{S3}^u) は、コンクリート標準示方書⁵⁾ から算出することができる。

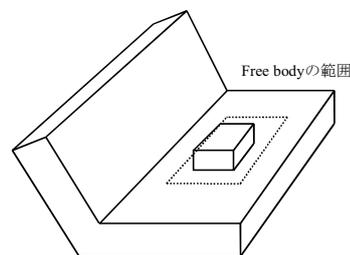


図-1 箱桁の突起定着部を切り出したフリーボディの範囲

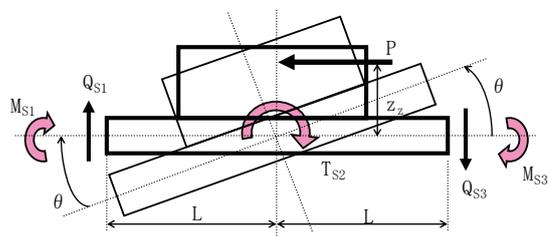


図-2 仮想変位 θ を与えたときの剛体変位

3. 非線形 FEM 解析

本研究では、3次元有限要素解析プログラム ATENA を用いて解析を行った。FEM 解析における荷重は変位制御で行い、修正 Newton-Raphson 法により節点力、節点変位ならびにエネルギーの残差が所定の収束判定値を満足するまで繰り返し計算を行った。本 FEM 解析では、収束判定値を 0.01 とし、繰り返し計算の回数は 700 回とした。所定の繰り返し回数を超えて収束判定値内に入らなかった場合には、強制的に FEM 解析を終了させた。これは、収束しない場合には、誤差を次のステップに持ち越すため、解の精度が保持できないと判断したためである。

コンクリートの構成則は、圧縮、引張ともに破壊エネルギーモデルで、鉄筋の構成則は弾塑性である。ひび割れは回転ひび割れモデルである。

供試体 (図-3 参照) の床版とウェブの要素分割は厚さ方向に 3 分割とした。これは、3 分割以上にすると断面内のひずみ勾配が再現でき、巨視的な荷重-変位関係に要素分割の影響が見られないためである^{3, 4)}。

4. 実験概要

実験に用いた供試体 (図-3 参照) は、箱桁橋の突起定着部周辺をモデル化した実橋箱桁床版の約 1/10 にした上床版のない縮小模型で、荷重は供試体を垂直に立てた状態で行った。供試体は、床版に接する突起の境界面の大きさを 2 種類に変化させた (BA-S では 100x100mm, BA-L では 100x160mm)。荷重は、床版面から 50mm 離れた位置に、圧板に相当する鋼製ブロック (50x50x30mm) を介して、変位制御で荷重した。床版とウェブは、厚さ 30mm で、φ3mm の鉄筋を 20mm 間隔とした金網を 2 層配筋し、それぞれのかぶりを 3mm とした。突起と床版には接合鉄筋を図-4, 5 のように配置した。突起の大きさは、圧板の大きさと接合鉄筋の配筋を考慮して定めた。測定は、突起下面の垂直変位 (def-y) ならびに突起の上下面に対応する位置の水平変位 (def-2, 3), さらに接合鉄筋のひずみについて行った (図-4, 5 参照)。

縮小模型の供試体にはマイクロコンクリートを使用し、W/C=65%, s/c=400vo1% で、骨材は 5mm ふるいを通した細骨材を使用した。ここに、マイクロコンクリートとは、コンクリート構造物の縮小模型に合わせて骨材を縮小したコンクリートをいい、一般にはモルタルの骨材粒径を調整したもの⁶⁾ である。細骨材 S の密度は 2.60g/cm³, セメント C の密度は 3.14g/cm³ であった。供試体の床版、ウェブならびに突起は同時にマイクロコンクリートを打設した。使用したマイクロコンクリートならびに鉄筋の強度特性を表-1, 2 に示す。

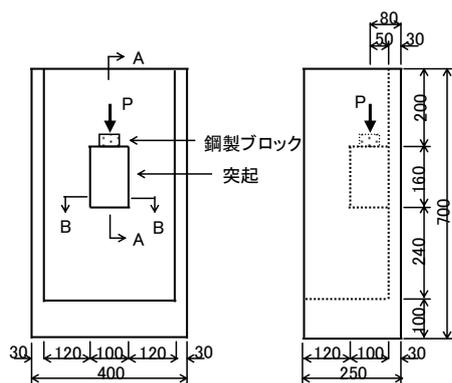
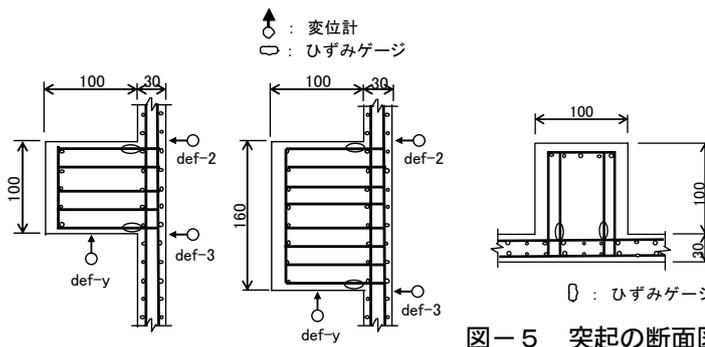


図-3 BA-L の供試体形状 (単位 : mm)



(a) BA-S (b) BA-L
図-4 突起の側面図 (A-A 断面)

図-5 突起の断面図 (B-B 断面)

表-1 マイクロコンクリートの強度特性

圧縮強度	割裂強度	ヤング係数
N/mm ²	N/mm ²	k N/mm ²
40.7	3.72	22.9

表-2 鉄筋の強度特性

直径	断面積	降伏強度	引張強度	ヤング係数
mm	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	k N/mm ²
2.77	6.026	602	625	235

5. 実験結果

5. 1 ひび割れ状況

BA-S のひび割れ状況 (図-6 参照) は, 突起の上面 (すなわち荷重側) と床版との境界面すなわち突起の付け根部分に, 突起に沿ったひび割れが 33.5kN のときに発生した (図-6 の①)。その後, 供試体内側の突起のある床版に 40.7kN で斜めひび割れが突起上面から下方へ発生した (図-6 の②)。さらに荷重し 44.0kN で突起背面 (すなわち供試体外側) の床版に, 突起下面から斜め上に向かう斜めひび割れが発生し, 同時に供試体外側のウェブに斜め上に向かう斜めひび割れが発生した (図-6 の③)。さらに, 突起本体にも斜めひび割れが発生した。最大荷重 52.5kN で突起と床版の境界面が突起の荷重側で大きく開口し, 徐々に荷重が低下していった。突起の下側では, 突起と床版の境界面は開口せず, 圧縮を受けていたことが実験終了後に観察されている。

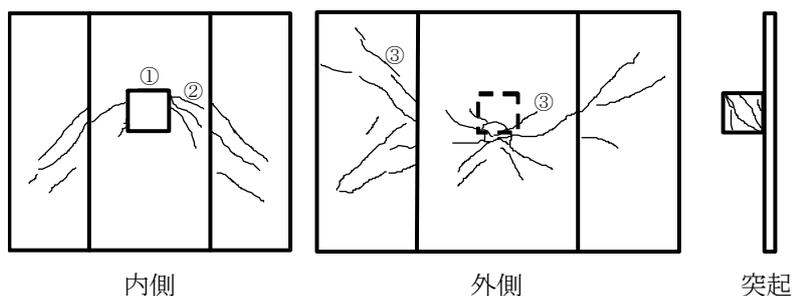


図-6 破壊後のひび割れ状況の展開図 (BA-S)

次に, BA-L のひび割れ状況 (図-7 参照) は, BA-S と同様に突起上面と床版との境界面に, 突起に沿ったひび割れが 25.8kN で発生した (図-7 の①)。その後, 40.1kN で内側の床版に, 突起付け根の上から下に向かう斜めひび割れが発生した (図-7 の②)。さらに変位制御で荷重を進めると, 荷重は増加せずほぼ同じ 40.0kN で外側の床版に突起下面から斜め上に向かう斜めひび割れが発生した (図-7 の③)。さらに荷重し, 50.2kN で床版の内側と外側で斜めひび割れが多数発生し (図-7 の④), 供試体外側のウェブにも上に向かう斜めひび割れ (図-7 の④) とともに, 突起本体にも斜めひび割れが発生していた。

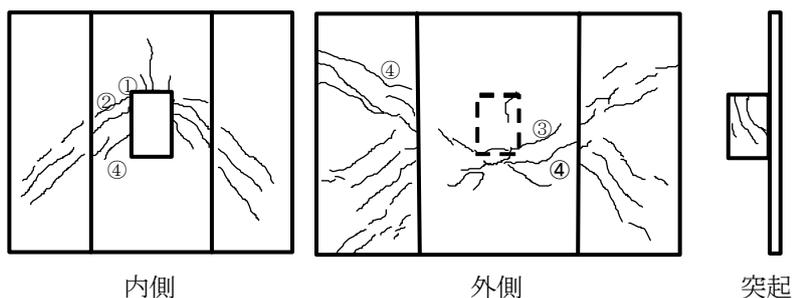


図-7 破壊後のひび割れ状況の展開図 (BA-L)

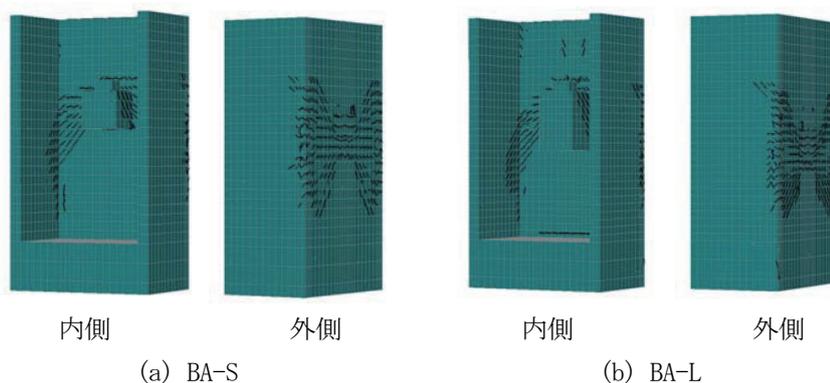


図-8 最大荷重時におけるひび割れ状況の FEM 解析結果

BA-S と BA-L はともに変位制御で荷重し, 最大荷重以降の変位の増加にともない, 斜めひび割れが伸展するとともに, 本数が増加して, BA-S では荷重が徐々に低下し, BA-L では急激に荷重が低下していった。このことから, BA-S と BA-L は破壊パターン 3 の構造体の破壊であったと判断している。

BA-S と BA-L の最大荷重時におけるひび割れ状況の FEM 解析結果をそれぞれ図-8 に示す。図-6 ~ 8

より、ひび割れ状況のFEM解析結果は実験結果とよく一致していると思われる。

5. 2 突起の変位性状

荷重と突起下面の垂直変位（すなわち荷重の載荷方向、図-4の def-y）との関係を図-9に示す。図-9からBA-SとBA-Lの実験結果は、両者とも荷重の増加にともない変位が増加している。供試体の内側と外側の床版に斜めひび割れが多数発生し、それらが伸展していくと（BA-Sでは約50kN、BA-Lでは約60kN以降）、荷重はあまり増加せずに変位が増加していき、最大荷重となった。def-yのFEM解析結果と実験結果とを比較すると、BA-SとBA-LのFEM解析結果はともに実験結果とよく一致している。

次に、突起の背面すなわち供試体外側の床版に取り付けた変位計から、荷重と突起の上下面に対応する位置の水平変位の関係を図-10に示す。ここに、def-2は突起上面、def-3は突起下面の位置に対応する水平変位で、def-2,3の符号はプラスが突起側へ、マイナスが突起背面側へ変位することを示している

（図-4参照）。図-10(a)から、BA-Sではdef-2が約52kNから変位の方向が逆転している。これは、突起と床版の境界面が突起上面で開口し、突起が床版から大きく離れたことによるものと推察される。一方、突起下面のdef-3は変位の方向が逆転することなく、変位が進行している。BA-SについてFEM解析結果と実験結果とを比較すると、def-2においては、約40kNまではFEM解析結果と実験結果はよく一致している。さらに、def-3においてもFEM解析結果と実験結果はよく一致している。

一方、図-10(b)からBA-Lではdef-2のFEM解析結果と実験結果はよく一致している。def-3のFEM解析結果は、約30kNまではよく実験結果と一致しているが、それ以降は実験結果と一致していない。これは、突起本体に斜めひび割れが約50kNで発生し、その後の荷重の増加にともない伸展し、突起と床版の境界面位置の斜めひび割れ先端でヒンジが形成され、突起全体が一体となって床版に作用しなかったためであると考えられる。

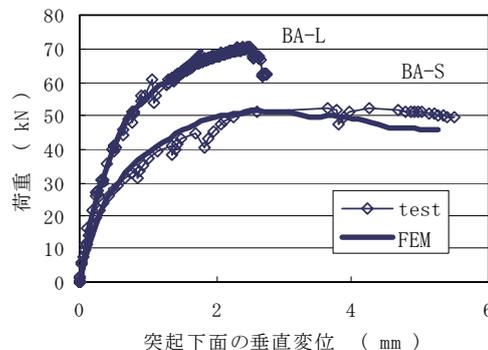


図-9 荷重と突起下面の垂直変位との関係

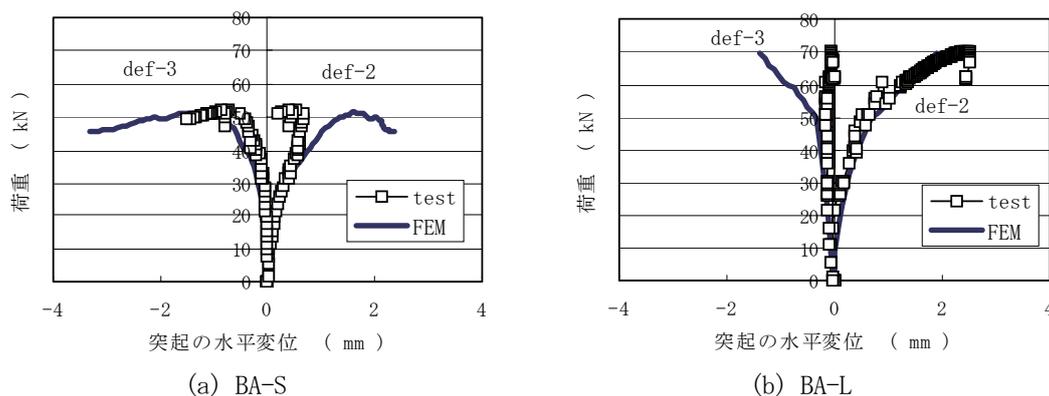


図-10 荷重と突起上下面の水平変位との関係

5. 3 荷重と接合鉄筋ひずみ

荷重と接合鉄筋ひずみとの関係を図-11に示す。接合鉄筋とは、突起と床版とを接合するために配筋した鉄筋である（図-4、5参照）。図-11(a)によれば、BA-Sの突起上面側の接合鉄筋のひずみ ϵ_{vu} は、荷重の増加とともに引張側に増加している。一方、突起下面側の接合鉄筋のひずみ ϵ_{vl} は、荷重の初期ではあ

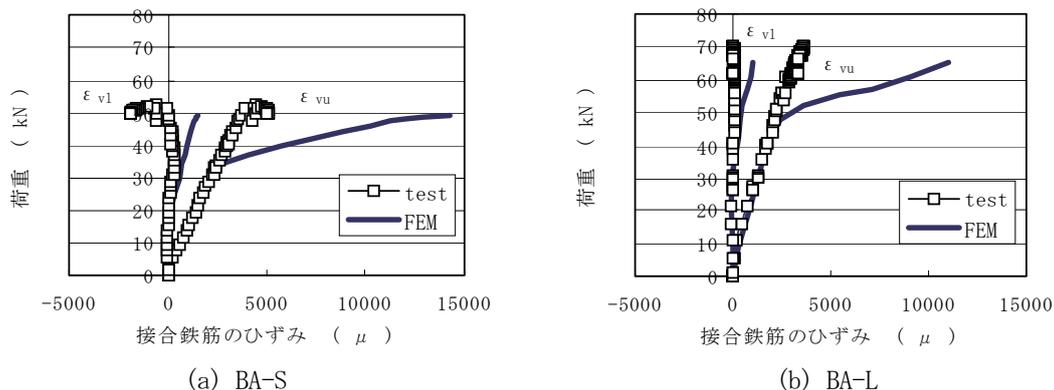
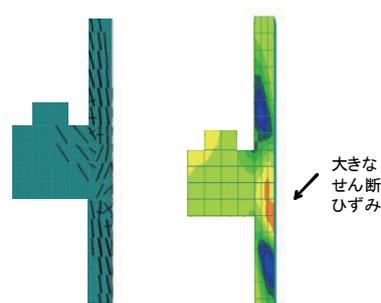


図-1-1 荷重と接合鉄筋ひずみとの関係

まり変化なく、約 25kN からひずみが引張となっている。さらに荷重を加えていくと、約 40kN から ϵ_{vl} が圧縮を受けるようになってくる。圧縮されていることは、実験終了後に行った突起と床版の境界面の観察で確認されている。

一方、図-1-1 (b)から BA-L は、荷重の増加にともない ϵ_{vu} は引張側に増加しているが、 ϵ_{vl} はあまり変化していない。

図-1-1 から BA-S と BA-L の接合鉄筋ひずみの FEM 解析結果は、ともに最大荷重の約 70% まではよく一致している。しかし、それ以上の荷重になると、 ϵ_{vu} と ϵ_{vl} の FEM 解析結果はともに引張側に増加している。 ϵ_{vl} の FEM 解析結果が荷重の増加にともない引張側に増加していることを調べるために、供試体の 1/2 を取り出して FEM 解析を行った。この FEM 解析結果 (図-1-2 参照) から、突起と床版の境界面において、突起上面にはひび割れが存在するが、突起下面にはひび割れない。さらに、突起下面側の床版内部には多数のひび割れが解析されている (図-1-2 (a))。一方、突起下面の付け根では突起が床版を水平方向へ押す圧縮応力が作用し、突起下面における床版内部の突起背面側には大きなせん断ひずみ (約 5000 μ) が解析されている (図-1-2 (b))。また、定着部の圧板の近傍には局部応力が作用し、割裂域が存在する⁷⁾。以上により、床版内部のひび割れを横切って配置されている接合鉄筋のひずみが引張側に増加して解析されたものと考えられる。



(a) ひび割れ状況 (b) せん断ひずみ
図-1-2 最大荷重時における突起と床版内部の状況 (BA-S)

5. 4 FEM ならびにマクロモデルによる破壊耐力

FEM ならびにマクロモデルによる破壊耐力について、実験値と計算値との比較を表-3 に示す。ここに、実験結果ならびに FEM 解析結果での最大荷重を破壊耐力 P_{ult} とする。マクロモデルは突起の周辺を切り出したフリーボディ

表-3 破壊耐力 P_{ult} の実験値と計算値との比較

供試体名	test kN	FEM		マクロモデル	
		calc kN	calc/test	calc kN	calc/test
BA-S	52.5	51.7	0.985	54.4	1.036
BA-L	70.3	69.4	0.988	73.3	1.043

を想定して破壊荷重を算定している。PC 箱桁定着部の破壊解析委員会では、突起の周囲を 1D (D は床版厚) だけ広げた範囲をフリーボディとしている^{3, 4)}。そこで、ここでも 1D だけ広げた範囲をフリーボディとして P_{ult} を計算した。表-3 によれば、FEM ならびにマクロモデルによる P_{ult} の計算値は実験値とよく一致している。

次に、マクロモデルではフリーボディの大きさが破壊耐力の値に著しく影響を与える。そこで、ここではフリーボディの範囲を変化させて P_{ult} を計算し、FEM 解析結果と比較して図-13に示す。図-13によれば、 nD の n が大きくなれば、すなわちフリーボディの範囲が大きくなれば、 P_{ult} が大きく計算されている。フリーボディを1Dだけ広げた範囲とした場合には、マクロモデルとFEMとの P_{ult} の比は、BA-Sでは1.052、BA-Lでは1.055となり、マクロモデルの計算値はFEM解析結果とよく一致している。

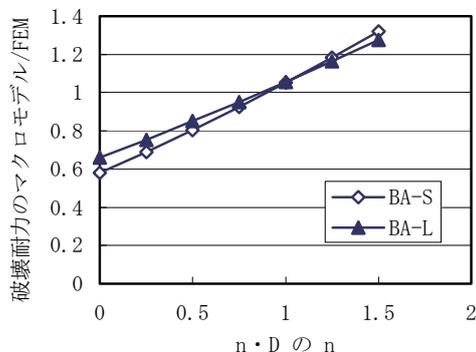


図-13 フリーボディの範囲を変化させたマクロモデルの破壊耐力とFEMとの比較

したがって、突起の周辺を1Dだけ広げてフリーボディとしたマクロモデルによる P_{ult} は、実験結果とよく一致しているとともに、FEM解析結果ともよく一致している。このことから、マクロモデルにより算出される P_{ult} は、FEMの解析精度の判定に適用できるものと考えられる。

6. まとめ

本実験の範囲内で以下のことがいえる。

- 1) 破壊耐力の実験値は、床版と突起の接触面が大きくなると、大きくなる。
- 2) ひび割れ状況について、FEM解析結果は実験結果と概ね一致している。
- 3) 荷重と突起下面の垂直変位(def-y)について、FEM解析結果は実験結果とよく一致している。荷重と突起の上下面に対応する水平変位(def-2,3)について、FEM解析結果は実験結果と概ね一致している。
- 4) 荷重と突起の接合鉄筋ひずみ (ϵ_{vu} と ϵ_{vl}) について、荷重が破壊耐力の約70%までは、FEM解析結果は実験結果とよく一致している。
- 5) 破壊耐力について、FEMならびにマクロモデルによる計算値は実験値とよく一致している。
- 6) 突起の周囲を1Dだけ広げた範囲をフリーボディとしたマクロモデルによる破壊耐力の計算値は、FEMの結果とよく一致している。

以上により、3D非線形FEM解析結果は、実験結果と概ね一致しているため、マイクロコンクリートを用いた模型供試体に対して適用できるものと考えられる。さらに、マクロモデルは、突起定着部の破壊耐力を算定する有用な方法であると考えられる。

最後に、本実験の整理に協力してくれた武岡智紀君に感謝する。なお、本研究は著者らが大学院に在籍中に実施したものである。

参考文献

- 1) 西川和廣, 廣松新, 伊藤公彦: 外ケーブル定着突起の形状および配筋に関する研究, 11回プレストレストコンクリート発展に関するシンポジウム論文集, pp.781-786, 2001
- 2) 大中英揮, 岡隆延, 加藤敏明, 小川整: 中国横断自動車道見延橋の大容量外ケーブル定着部実物大試験報告, 10回プレストレストコンクリート発展に関するシンポジウム論文集, pp.237-242, 2000
- 3) PC箱桁定着の破壊解析委員会: PC定着部の破壊解析に基づく性能設計, プレストレスト技術協会, 2004
- 4) 内田裕市, 柳沼善明, 田辺忠顕: PC箱桁定着部破壊解析委員会報告(その1) —外ケーブル定着部の非線形解析とマクロモデルの検討—, プレストレストコンクリート, Vol.47, No.1, pp.71-80, 2005
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002
- 6) 日本コンクリート工学協会: コンクリート便覧, pp.1019-1021, 1987
- 7) 岡田清, 藤井学, 小林和夫: プレストレストコンクリート構造学, 国民科学社, pp.139-141, 1990